УДК 541.16

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ В НИИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

А.П. Ильин

Представление данные о работах, выполненных в НИИ высоких напряжений и связанных с электрическим взрывом проводников и получением нанопорошков.

Введение

По заключению экономической комиссии ООН ультрадисперсные (нано-) материалы входят в десятку материалов XXI-го века. В развитие нанотехнологий США вкладывают около 1 млрд долларов ежегодно, и объем инвестиций стремительно растет. В ряде стран (США, Япония, Франция, Германия, Китай и др.) имеются национальные программы, в реализацию которых вкладываются как государственные финансы, так и финансы отдельных компаний. Как правило, эти программы включают разработку технологий двойного назначения (гражданского и военного) и содержат разделы, касающиеся разработок чисто военного назначения. В СССР существовали и выполнялись несколько отраслевых программ. В 80-е гг. прошлого столетия был выполнен большой объем поисковых работ по получению, исследованию свойств и поиску областей применения ультрадисперсных порошков, что обеспечило в последующем приоритетные позиции России в этом направлении науки.

В НИИ высоких напряжений в начале 70-х гг. по инициативе Г.В. Иванова были начаты работы по получению УДП с помощью электрического взрыва проводников в газовых средах. Усилиями специалистов различного профиля метод электрического взрыва проводников к настоящему времени доведен до уровня опытно-конструкторской разработки (основ технологии). По производительности УДП (~50 г/час по алюминию) действующие электровзрывные установки превосходят известные установки по получению с помощью испарения - конденсации, электроискрового распыления.

Часть сотрудников НИИ ВН перешли в другие организации и продолжили работы по электровзрывной технологии. Несколько установок для получения нанопорошков с помощью электрического взрыва проводников поставлены в США, Германию, Респ. Корея, Китай и другие страны. Интерес к электровзрывной технологии не постоянен, но всегда имеется спрос на информацию по электрическому взрыву проводников, по конструкции установок, по свойствам нанопорошков и их применению в конкретных областях техники и технологий. Практически всеми специалистами признается, что уменьшение характерного размера веществ до уровня <1 мкм и, тем более, ≤0,1 мкм переводит их в новое состояние. Тем не менее, с нанопорошками продолжают работать как с обычными или пытаются их использовать в традиционных композициях. Для получения технических эффектов при использовании нанопорошков требуются принципиально отличные от традиционных подходы, которые могут быть реализованы при накоплении информации специалистами различных профилей.

Сотрудниками НИИ ВН в разные годы были защищены кандидатские [1-10] и одна докторская диссертация (А.П. Ильин), в которых нашли отражение достижения в области электровзрывных порошков как прикладного, так и фундаментального характера.

Целью данной публикации является демонстрация наиболее значимых результатов, полученных при исследовании процессов, представляющих электровзрывную технологию получения нанопорошков.

В работе представлен механизм электрического взрыва, отражающий неравновесный характер воздействия энергии высокой плотности мощности. В плане возможностей получения различных по составу нанопорошков ЭВП рассмотрен как химический реактор, в котором вторичные продукты взрыва при взаимодействии с химически активными газами дают нанопорошки различных химических веществ. Несомненный интерес для специалистов в области малых частиц представляет модель энергонасыщенной частицы, с помощью которой можно объяснить повышенную устойчивость электровзрывных нанопорошков при обычной температуре, пороговые явления в нанопорошках при нагревании, каталитические и другие свойства.

1. Механизм электрического взрыва

Одним из способов воздействия энергии высокой плотности мощности (J_p) на металлы является электрический взрыв проводников ($J_p \geq 10^{14}$ Вт/м^3) [11]. Существующие представления об изменении физического состояния металлов в процессе электрического взрыва проводников (ЭВП) основано на рассмотрении таких явлений как вскипание, формирование структурных неоднородностей магнитногидродинамических неустойчивостей и других процессов, считающихся квазиравновесными или равновесными [11-15]. Основанием для формирования нового подхода к рассмотрению процесса взаимодействия энергии высокой плотности мощности с металлами являются следующие экспериментальные данные: аномально высокая эмиссия электронов при ЭВП с ещё неразрушенной проволочки, которая может в 100 раз превышать плотность тока насыщением из металлов при температуре их плавления [16]; наличие 30...40 % вещества

проводников в ионизованном состоянии при введении в проводник энергии, сравнимой лишь с теплотой сублимации проводника [11]; повышение на стадии собственно взрыва примерно в 100 раз энергии излучения в ИК диапазоне относительно энергии теплового излучения при температуре, до которой нагрелся бы металл, если бы вся вводимая с него энергия расходовалась на нагрев в соответствие с законом Джоуля-Ленца [17]; излучение, наблюдающееся на стадии собственно взрыва в видимом и ультрафиолетовом спектральных диапазонах, обладает признаками люминесценции, которая может возбуждаться в результате быстрого диспергирования жидкого металла и возникновения напряженности электрического поля между фрагментами [17].

Ранее было показано, что с увеличением величины вводимой в проводник энергии (W) дисперсность конечных продуктов электрического взрыва медных и алюминиевых проводников в среде аргона повышается, а распределение частиц по размерам сужается [18]. Проведенные эксперименты показали, что с повышением W не только уменьшаются размеры частиц, но и снижаются размеры областей когерентного рассеяния (d_{OKP}) (рис. 1).

Можно предположить, что первичные продукты диспергирования проводников в процессе их разлета и взаимодействия превращаются в более крупные частицы с кристаллической структурой, отражающей размеры первичных продуктов. Действительно, с повышением дисперсности конечных продуктов ЭВП наблюдается уменьшение размеров d_{OKP}. Согласно полученным результатам увеличение вводимой энергии более 0,8...1,6 W/W_c (W_c - энергия сублимации взрываемого проводника) приводит к резкому росту дисперсности конечных продуктов (рис. 1), а при дальнейшем увеличении W/W_c дисперсность растет значительно медленнее. Расчеты показывают, что прирост площади удельной поверхности к приросту энергозатрат ($\Delta S/\Delta W$) на первом участке составляет 1 м^2/кДж, а на втором более 1,5 м^2/кДж (W/W_c = 1,8...2.0). Таким образом, повышение W для получения ультрадисперсных порошков становится энергетически не выгодным.

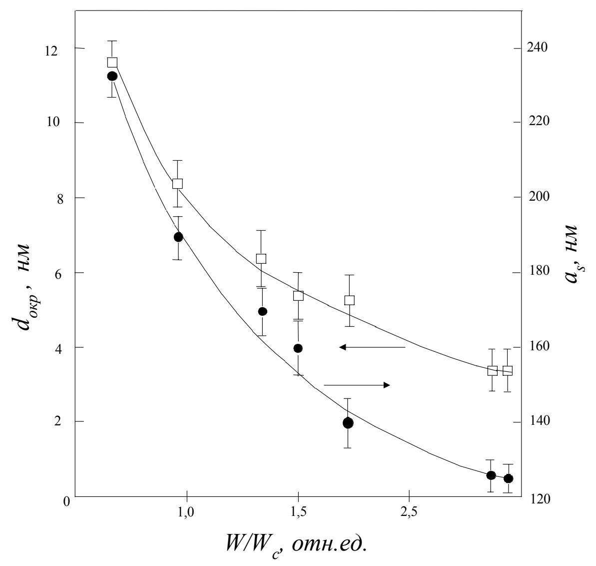


Рис. 1. *Зависимости среднего диаметра частиц a_s и областей когерентного рассеяния $d_{окр}$ от энергии (W/W_c, отн. ед.), введенной при электрическом взрыве алюминиевых проводников в среде аргона*

При электрическом взрыве медных проводников на воздухе при одинаковой вводимой энергии (W=1,5W_c) дисперсность конечных продуктов с повышением плотности мощности J_p возрастает. Введение в металл энергии с высокой плотностью мощности приводит к неравновесности процессов, при этом диссипация энергии происходит по всем возможным каналам, в том числе и энергетически невыгодным в равновесных условиях.

В соответствие с принципом Ле-Шателье-Брауна при внешнем воздействии (вводимой в металл энергии) в металле происходят процессы, противодействующие этому внешнему воздействию. Возрастает доля энергии, расходуемой на ионизацию, и, таким образом, в тепло переходит меньше энергии, чем это следует из закона Джоуля-Ленца.

Конечными продуктами при введении в металлы энергии с высокой плотностью мощности в химически инертной среде являются высокодисперсные порошки металлов (табл. 1, 2). На стадии их охлаждения полной релаксации порошков не происходит, и часть энергии "затормаживается" в виде запасенной энергии поверхности, внутренних дефектов, зарядовых состояний [19]. В определенных случаях величина запасенной энергии может превысить стандартную теплоту плавления металла (табл. 1). Неравновесность процессов, протекающих при охлаждении, и сохранение в металле запасенной энергии приводят также к отклонению от величины интеграла действия, т.е. от закона Джоуля-Ленца [12, 13].

Следовательно, критерием неравновесности процессов, протекающих при введении в металл энергии с высокой плотностью мощности при электрическом взрыве, является отклонение от закона Джоуля-Ленца для любого интервала времени, как при введении энергии (вынужденный процесс), так и в течение более длительного временного интервала при охлаждении продуктов взаимодействия (самопроизвольный процесс), когда электрический ток уже не протекает. В отличие от процессов, протекающих в металлах при воздействии потоков энергии с низкой плотностью мощности, процессы диссипации энергии при ЭВП не могут корректно характеризоваться как джоулевский нагрев и описываться интегралом действия [11-13].

Наиболее энергоёмким каналом диссипации энергии является ионизация. Так, например, для алюминия, скрытая теплота плавления составляет 10,8, теплота сублимации - 327, а первый потенциал ионизации составляет уже 577,6 кДж/моль. В ус-

Таблица 1. *Характеристики порошков Al, определенные с помощью калориметрии растворения (0,3 Н раствор HCl)*

Образец	$S_{уд.}$, $м^2/г$	Энтальпия образования Al_2O_3,ΔH^0_{298}, кДж/моль	Энтальпия растворения, кДж/моль
Нанопорошок Al (H_2)	7,4	1728,4±6,0	590,3±8,0
Нанопорошок Al (Ar)	6,4	1729,7±2,1	578,4±7,4
АСД-4 (эталон)	0,8	1667,7±5,0	510,8±8,3

Таблица 2. *Фазовый состав УДП, получаемых ЭВП*

Материал взрываемой проволочки	Газ-среда при электрическом взрыве	Конечные продукты ЭВП
W Ti Fe	Ar Ar CO (H_2)	α-W + β-W α-Ti +β-Ti α-Fe + γ-Fe
Fe-Ni Pb-Sn Cu-Zn	Ar Ar Ar	α-Fe, γ-Fe, Ni, Fe α-Pb, α-Sn α-фаза латуни
Cu+Fe Cu+Al Fe+Al	Ar Ar Ar+H_2	Твердые растворы, Cu-Fe и Cu^0, Fe^0 Al, Cu, $CuAl_2$, Cu_9Al_4 Al, α-Fe, γ-Fe, Fe_2Al_5, Fe_3Al, FeAl
W Ta Ti	C_2H_2 (Ar) CH_4 (Ar) C_2H_2 (Ar)	α-WC, WC_{1-x}, W_2C, α-W, β-W TaC, α-Ta_2C, α-Ta β-Ti, TiC
Ti Al Al (Y_2O_3) Al (B)	O_2 (Ar) O_2 (Ar) N_2 Ar	TiO_2 – рутил, TiO_2 – анатаз γ-Al_2O_3, (α-Al_2O_3) AlN, Al^0, Y_2O_3 Al^0, (AlB_2)

ловиях импульсного действия энергии равновесия между каналами диссипации энергии не достигается, вследствие чего возможно одновременное сосуществование вещества в различных энергетических состояниях. В каждый промежуток времени:

$$J_p = \gamma \cdot \Delta E^2 + \sum_{i=1}^{n_i} E_{a_i} \cdot \tau_i \ ,$$

где, $\gamma\Delta E^2$ - тепловой канал диссипации энергии согласно закону Джоуля-Ленца; n - число нетепловых каналов диссипации энергии; E_{a_i} - энергия активации i-го канала; τ_i - характерное время физического процесса передачи энергии i-го канала.

Входящие в уравнение параметры γ, E_a,τ_i являются зависимыми от температуры переменными. Характерное время передачи электрической энергии электронной подсистеме металлов - процесса ионизации составляет 10^{-16} с, а время передачи энергии атомной подсистеме составляет не менее времени одного колебания атомов, т.е. > 10^{-8} с. При быстром электрическом взрыве характерное время процесса составляет $1...10 \cdot 10^{-6}$ с [11].

Необходимость в детализации механизма электрического взрыва связана с отсутствием корреляции между используемыми электрическими параметрами (критериями подобия [20]) и дисперсностью-свойствами электровзрывных нанопорошков. При одинаковых значениях критериев подобия, но при различных значениях напряжения, емкости разрядного контура и т.д. получаются нанопорошки с различными свойствами-дисперсностью: задача регулирования характеристик нанопорошков к настоящему времени не решена.

2. Электрический взрыв проводников как химический реактор

На первом этапе развития электровзрывной технологии отрабатывались условия получения в основном нанопорошков металлов [2-4]. Значительный объем экспериментов по получению нанопорошков различных химических соединений был проведен Д.В. Тихоновым [8]. Были определены условия получения интерметаллидов, оксидов, карбидов и нанопорошков композитов, например, AlN-Y_2O_3-Al. При выполнении диссертации О.Б. Назаренко показала, что при электрическом взрыве в жидкостях их плотность (динамическая вязкость) могут выступать в качестве параметра регулирования химического, фазового состава и дисперсности конечных продуктов электрического взрыва [7]. Важным результатом ее работы является обнаружение корреляция между выходом химического соединения при ЭВП и верхней температурной границей устойчивости этого продукта, что косвенно подтвердило предположение о химическом взаимодействии первичных продуктов электрического взрыва со средой, а именно на конечной стадии разлета. В табл. 2 представлены возможные варианты получения различных нанопорошков (в качестве примера показаны конечные продукты ЭВП трех видов проводников).

3. Структурно-энергетическое состояние электровзрывных нанопорошков и процессы релаксации в них

Нанопорошки и кластеры могут быть получены в различных условиях: в достаточно медленных процессах, близких к равновесию, и экстремальных. При одинаковой дисперсности и равных энергиях поверхности (E_S) частицы будут иметь различие в запасенной энергии. Частицы, полученные в сильно неравновесных условиях, будут иметь избыточную, запасенную за счет внутренней структуры, энергию E_V, по сравнению с частицами, сформировавшимися в равновесных условиях и имеющими лишь энергию E_S. В принципе E_V может быть запасена не только нанопорошками, но и более крупными порошками, массивными металлами: чем больше размер частиц, тем сложнее осуществить неравновесность процессов их получения.

В настоящее время нет особых проблем для перевода веществ в высоковозбужденные продукты при воздействии на них лазерного и сильноточного

электронного излучений, высоковольтного электрического разряда и т.д. [11, 21]. При этом основной проблемой является создание энергетического барьера, определяющего устойчивость метастабильного состояния после вынужденного энергетического воздействия: должны быть созданы физические условия, обеспечивающие кинетическое торможение термодинамически разрешенных релаксационных процессов. Именно кинетическое торможение во взрывных процессах формирует энергетический барьер.

В зависимости от скорости и величины вводимой в вещество энергии могут достигаться различные уровни возбуждения его структурных единиц. Наиболее энергонасыщены структуры с разделенными зарядами $2M \rightarrow M^{+} + M^{-}$, обладающие запасенной энергией более 3...6 эВ/атом (290...580 кДж/моль). Для ряда металлов характерны более высокие эффективные зарядовые состояния: величина запасенной энергии у них существенно выше. В терминологии электронной плотности структуры с разделенными зарядами представляют собой знакопеременные волны плотности заряда. Диспропорционирование атомов металлов с образованием устойчивых электронных конфигураций может быть описано в рамках конфигурационных представлений о структуре веществ [22], более адекватно отражающих свойства и структуру малоразмерных объектов, чем представления Друде-Лоренца. Такого вида формы запасенной энергии располагаются между химической и физической (ядерной) формами движения материи [23].

Анализ электронных состояний атомов и ионов металлов с позиций конфигурационных представлений показывает, что как катионы, так и анионы таких металлов, таких как серебро, медь, алюминий, не имеют свободной "металлической" орбитали и, следовательно, построенные из них структуры не будут обладать металлической проводимостью. Электроны внешних подуровней таким образом локализованы, что, наряду с отсутствием металлической проводимости, повышает устойчивость зарядовых структур.

Основными предпосылками для разработки предлагаемой модели энергонасыщенной структуры (ЭНС) с запасенной энергией, превышающей стандартную для данного металла теплоту плавления, являются следующие экспериментальные данные: 1 - повышенная теплота спекания нанопорошков в вакууме, сгорания в кислороде, растворения в воде при соответствующем pH [24, 25]; 2 - устойчивость к окислению при обычных температурах и резкое повышение реакционной способности при переходе через пороговую температуру [26]; 3 - уменьшение толщины оксидной оболочки на частицах нанопорошков с уменьшением диаметра частиц [27, 28]; 4 - разделение в электрофильтре частиц металлов, полученных с помощью электрического взрыва проводников в благородных газах до контакта нанопорошков с воздухом.

Как уже отмечалось выше, нанопорошки металлов - это коллоидные системы с твердой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой. Существенным отличием от существующих представлений коллоидной химии - современной теории строения двойного электрического слоя Штерна [29] - является учет химического взаимодействия с образованием очень тонкой оксидно-гидроксидной пленки.

Образование двойного электрического слоя по Штерну связано с образованием плотного монослоя (слоя Гельмгольца) и диффузного слоя (слоя Гуи) противоионов; т.е. двойной электрический слой подобен сферическому конденсатору с определенной емкостью. На частицах металлов в случае очень тонких пленок формирование двойного электрического слоя сопряжено с протеканием химических процессов. Металлы по своей природе являются восстановителями и поэтому, отдавая электроны, заряжаются положительно. Электрический ток, протекающий при электрохимической реакции - окислении металла кислородом и водой (фарадеевский ток), создает дополнительный потенциал [30]. Таким образом, общая поляризационная емкость межфазной границы металл-газ:

$$C_{пол} = C_{д.с.} + C_{пс},$$

где $C_{д.с.}$ - емкость двойного электрического слоя; $C_{пс}$ - псевдоемкость, обусловленная протеканием химической реакции.

Согласно теории окисления Вагнера, стабилизирующие металлическую поверхность оксидно-гидроксидные пленки образуются за счет диффузии ионов и электронов, а не нейтральных атомов или молекул [31]. Установление равновесия между частицей и реакционно-способной окружающей газовой средой достигается при взаимной компенсации химического потенциала (μ) окислительно-восстановительных процессов и порожденного этими химическими процессами электростатического потенциала.

Согласно экспериментам, продукты диспергирования металлических проводников в помощью электрического взрыва проводников разделяются по заряду в электрофильтре. Отсутствие спекания нанопорошков после их коагуляции связано с наличием плотной газовой оболочки вокруг каждой частицы, что исключает контакт металлических поверхностей различных частиц. На рис. 2 схематично показана роль газа-среды (аргона) в стабилизации частиц нанопорошков, имеющих различный заряд. При ЭВП заряд частиц может формироваться в результате термоэмиссии, ионизации электрическим полем, а стабилизации зарядовых структур способствуют высокие скорости охлаждения продуктов и наличие магнитных полей [11]. Заряженные частицы более прочно удерживают дисперсионную среду-аргон - за счет более сильных диполь - индуцированный диполь взаимодействий в сравнении с нейтральными частицами, аргон на поверхности которых удерживается за счет дисперсионных взаимодействий (рис. 2). При пассивировании происходит передача (дрейф через

оксид) электрона от металла к окислителю или дрейф окислителя-протона H^+ к поверхности металла. За счет этих процессов у положительно заряженной в условиях ЭВП частицы положительный заряд увеличивается, быстрее достигая необходимого для торможения окисления-восстановления электростатического потенциала, чем для нейтральных по заряду частиц. В случае отрицательно заряженных частиц на первой стадии будет интенсивно протекать процесс окисления-восстановления до полной компенсации этого заряда, а затем окислению подвергнется дополнительное количество металла, чтобы достичь положительного потенциала, необходимого для стабилизации.

Таким образом, природа потенциального барьера, обеспечивающего стабильность энергонасыщенной структуры, связана с электростатическим полем самой структуры с разделенными зарядами. Подробная схема строения такой ЭНС представлена на рис. 3.

Экспериментально обнаружено, что электровзрывные нанопорошки устойчивы при хранении в условно герметичной таре или в сухой атмосфере в течение 10...15 лет (максимальная длительность экспериментов), но быстро деградируют во влажной атмосфере [32]. Активность протонов как окислителя связана с легкостью диссоциации воды на оксидах:

$$H_2O \leftrightarrow OH^- + H^+,$$
$$H_2O \leftrightarrow O^{2-} + 2H^+ \ [33].$$

Взаимодействие окислителя с металлом протекает следующим образом:

$$nH^+ + M^0 \rightarrow M^{n+} + nH^0,$$
$$M^0 + nH^0 \rightarrow MH_n,$$
$$H^0 + H^0 \rightarrow H_2.$$

Проявление восстановительных свойств металлов связано с отдачей и дрейфом электронов к наружной поверхности оксида. В случае очень тонкой оксидно-гидроксидной пленки в ней не накапливается объемный заряд, так как только при очень малой толщине пленки она обеспечивает электростатическое взаимодействие зарядов вблизи ее внешней и внутренней поверхности. При увеличении толщины до нескольких десятков нанометров это взаимодействие нарушается: возникают внутренние двойные электрические слои и объемные заряды. Процесс окисления становится диффузионно контролируемыми, что характерно для высоко- и грубодисперсных порошков и массивных металлов [34].

Одним из факторов устойчивости ЭНС с разделенными зарядами является отсутствие у нее металлической проводимости:

$$Cu^0(3d^{10}4s^1) \rightarrow Cu^+(3d^{10}4s^0),$$
$$Ag^0(4d^{10}5s^1) \rightarrow Ag^+(4d^{10}5s^0),$$
$$Al^0(3s^23p^1 \text{ или } 3s^13p^2) \rightarrow Al^+(3s^23p^0),$$
$$Cu^0(3d^{10}4s^1) \rightarrow Cu^-(3d^{10}4s^2),$$
$$Ag^0(4d^{10}5s^1) \rightarrow Ag^-(4d^{10}5s^2),$$
$$Al^0(3s^23p^1 \text{ или } 3s^13p^2) \rightarrow Al^-(3s^23p^3).$$

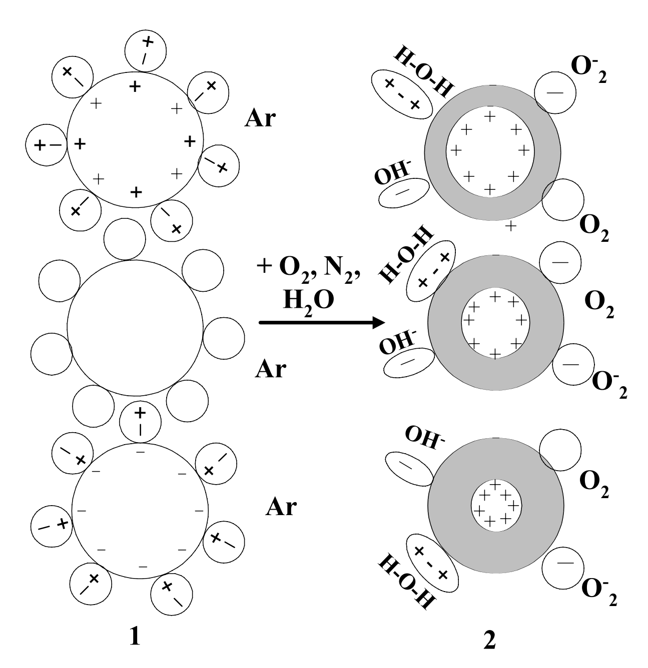


Рис. 2. *Схема преобразований в частицах порошков, полученных с помощью ЭВП в аргоне и имеющих заряд: структура частиц 1) до их контакта с воздухом и 2) после протекания окислительно-восстановительных процессов при стабилизации частиц на воздухе (заштрихована оксидная оболочка)*

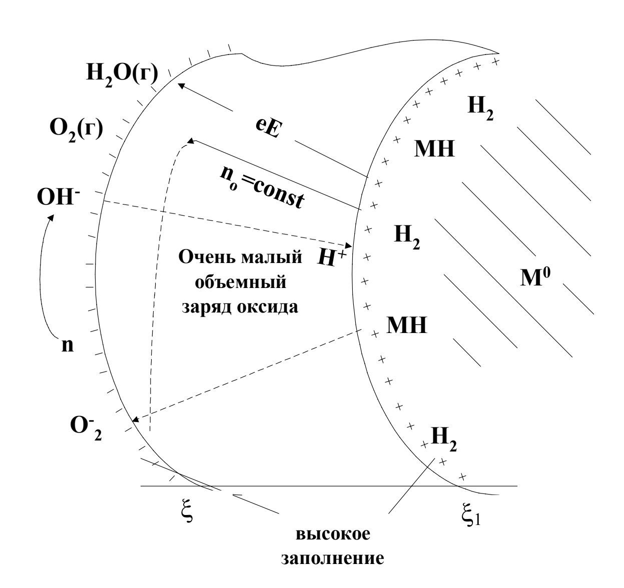


Рис. 3. *Схема строения энергонасыщенной структуры частицы нанопорошков: E - напряженность электрического поля, ξ - толщина оксидного слоя (случай очень тонкой оксидной пленки)*

Если исходить из механизма диспергирования проводников при ЭВП-распаде проводников на жидкоподобную кластерную и паровую фазы [11], то можно предположить возможность формирования сложных зарядовых структур, построенных только из вещества проводника. При введении в проводник электрической энергии, близкой к энергии сублимации взрываемого проводника за 10...100 мкс, процесс диспергирования является сильно неравновесным: наряду с жидкоподобной фазой, присутствуют пароподобная фаза и плазма. На начальной стадии диспергирования газоподобная отрицательно заряженная фаза как более легкая быстрее удаляется от оси проводника, но быстрее тормозится. На следующей стадии положительно заряженная жидкоподобная фаза догоняет и пронизывает слой газоподобных продуктов. Учитывая, что за время раздельного существования продукты ЭВП заметно снижают свою температуру, возможность стабилизации зарядовых структур возрастает.

Проведенные эксперименты и расчеты показывают, что нанопорошки металлов при определенных условиях их получения имеют избыточную запасенную энергию, превышающую стандартную для этого вещества теплоту плавления [26]. Особенностью метастабильного состояния таких нанопорошков является наличие энергонасыщенной структуры в их частицах. Формирование энергонасыщенной структуры осуществляется уже при получении нанопорошков, и она сохраняется при мягких условиях пассивирования порошков. ЭНС представляет собой двойной электрический слой с положительно заряженным приповерхностным слоем, определяющим устойчивость нанопорошков к окислению.

Заключение

Ограниченный объем данной публикации не позволяет охватить все интересные в научном и практическом плане достижения в электровзрывной технологии. Значительный научный интерес представляет установленное в НИИ ВН явление химического связывания азота при горении ряда порошков в воздухе. Этот вопрос подробно изложен в монографии [35].

Явление электрического взрыва проводников целенаправленно использовано для получения нанопорошков, но оно может применяться в десятках других направлений науки и техники. В то же время исследование ЭВП требует даже с целью получения нанопорошков привлечения специалистов различного профиля в связи с необходимостью установления закономерностей в последовательности: получение нанопорошков (ЭВП) - исследование их свойств и характеристик - поиск наиболее эффективных областей применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневецкий И.И. Исследование разложения углеводородов в импульсных электрических разрядах. Дис. ... к.т.н. - Томск, 1974. - 237 с.
2. Яворовский. Н.А. Электрический взрыв проводников - метод получения ультрадисперсных порошков. Дис. ... к.т.н. - Томск, 1982. - 127 с.
3. Давыдович В.И. Разработка технологического процесса и оборудования для электровзрывного получения порошков металлов с низкой электропроводностью. Дис. ... к.т.н. - Томск, 1986. - 254 с.
4. Лернер М.И. Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников. Дис. ... к.т.н. - Томск, 1988. - 155 с.
5. Ляшко А.П. Особенности взаимодействия с водой и структура субмикронных порошков алюминия. Дис. ... к.х.н. - Томск. 1988. - 178 с.
6. Проскуровская Л. Т. Физико-химические свойства электровзрывных ультрадисперсных порошков алюминия. Дис. ... к.х.н. - Томск. 1988. - 155 с.
7. Назаренко О.Б. Особенности формирования продуктов электрического взрыва проводников в конденсированных средах. Дис. ... к.т.н. - Томск. 1996. - 129 с.
8. Тихонов Д.В. Электровзрывное получение ультрадисперсных порошков сложного состава. Дис. ... к.т.н. - Томск, 2000. - 237 с.
9. Ан В.В. Применение нанопорошков алюминия при получении нитридсодержащих материалов. Дис. ... к.т.н. - Томск, 1999. - 160 с.
10. Громов А.А. Получение нитридсодержащих материалов при горении сверхтонких порошков алюминия и бора. Дис. ... к.т.н. - Томск, 2000. - 189 с.
11. Бурцев В.А., Калинин К.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 288 с.
12. Седой В.С., Валевич В.В., Орешин В.Н. и др. Исследование действия объемного источника энергии высокой плотности на металлы образования энергетически насыщенных наноразмерных частиц, исследование их физико-химических свойств. В сб.: Интеграционных программ фундаментальных исследований СО РАН. - Новосибирск, 1988. - С. 239-254.
13. Седой В.С., Валевич В.В., Герасимова Н.Н. Синтез высокодисперсных порошков методом электрического взрыва в газе пониженного давления // ФХОМ. - 1999. - № 4. - С. 92-95.
14. Мартынюк М. М. Роль испарения и кипения жидкого металла в процессе электрического взрыва проводника. // ЖТФ. - 1974. - Т. 44, вып. 6. - С. 1262-1270.
15. Кускова Н.И. Волны фазовых превращений в сильных электрических полях // Письма в ЖТФ. - 1998. - Т. 24, № 14. - С. 41-44.
16. Лебедев С.В., Хайкин С.Э. Некоторые аномалии в поведении металлов, нагреваемых импульсами тока большой плотности. // ЖЭТФ. - 1954. - Т. 26, вып. 5. - С. 629.

17. Искольдский А., Пикус В.К., Энельбаум Я.Г. Электрический взрыв проводников. Устойчивость фронта фазового превращения. Препринт № 32 ИА и ЭТАИ СССР. - Новосибирск: ИАиЭ, 1976.
18. Котов Ю.А., Яворовский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // ФХОМ. - 1978. - № 4. - С. 24-29.
19. Ильин А.П. Особенности энергонасыщенной структуры малых металлических частиц, сформированных в сильнонеравновесных условиях // ФХОМ. - 1997. - № 4. - С. 93-97.
20. Азаркевич Е.И. Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников // ЖТФ. - 1973. - Т. 43. - № 1. - С. 141-145.
21. Аврорин Е.Н, Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортов В.Е. // УФН. - 1993. - Т. 63. - № 5. - С. 1-34.
22. Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. Электронная локализация в твердом теле. - М.: Наука, 1976. - 339 с.
23. Полинг Л., Полинг П. Химия. - М.: Мир, 1978. - 683 с.
24. Ключников В.А., Шебалин А.И., Сухушин Ю.Н., Ильин А.П. и др. Особенности термохимических исследований высокодисперсных порошков // Физико-химия ультрадисперсных порошков. Ч.1. Межвуз. сборник науч. трудов. - Томск: НИИ ВН, 1990. - С. 24-27.
25. Гаджиев С.Н., Ильин А.П., Кертман С.В., Хасанов И.М. Энергетика алюминия в ультрадисперсном состоянии // Физико-химия ультрадисперсных порошков. Ч.1. Межвуз. сборник науч. трудов. - Томск: НИИ ВН, 1990. - С. 62-67.
26. Ильин А.П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок // ФХОМ. - 1994. - № 3. - С. 94-97.
27. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. окисление алюминия в ультрадисперсном состоянии на воздухе // Порошковая металлургия. - 1990. - № 9. - С. 31-36.
28. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. - М.: Химия, 1988. - 464 с.
29. Дамаскин Б.Б., Петрий О.П., Подловченко Б. И. и др. Практикум по электрохимии: Учебн. пособие для хим. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1991. - С. 165-166.
30. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности. Ч. II. - М.: ИЛ, 1963. - 275 с.
31. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т., Терещенко А.Г. Влияние относительной влажности воздуха на стабильность ультрадисперсных порошков алюминия // Получение, свойства и применение энергонасыщенных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Всеросс. конф. - Томск: НИИ ВН, 1993. - С. 52.
32. Колотыркин Я.М., Алексеев Ю.В. // Электрохимия. - 1992. - Т. 31. - № 1. - С. 5-10.
33. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов / Пер. с англ. А.В. Алексеева - М.: Металлургия, 1965. - 428 с.
34. Свиридов В. В. Фотохимия и радиационная химия твердых неорганических веществ. - Минск: Высшая школа, 1964. - 390 с.
35. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. - 154 с.

УДК 621.311.1.001.5